

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201704033

# 有机碳源对厌氧氨氧化污泥颗粒化的影响

李冬<sup>1</sup>, 王艳菊<sup>1</sup>, 吕育锋<sup>1</sup>, 杨航<sup>2</sup>, 成朔<sup>1</sup>, 吕赛赛<sup>1</sup>, 曹瑞华<sup>1</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>

(1. 水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室(北京工业大学), 北京 100124;

2. 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为探究有机碳源对厌氧氨氧化(Anammox)污泥颗粒形成的影响, 采用两组平行的SBR, 通过改变进水中有机碳源的质量浓度进行研究. 结果表明, 适量的有机碳源(<130 mg/L)可通过提高反应器中的胞外聚合物(EPS)含量从而加速颗粒污泥的形成, 提高污泥的沉降性能. 添加与不添加有机碳源的两组反应器分别于28和35 d颗粒化成功, 平均颗粒粒径分别达450和409 μm. 过量有机碳源(>230 mg/L)会使污泥出现解体, 粒径减小, 污泥的沉降性能明显变差. 当有机碳源小于110 mg/L时, 可通过反硝化作用促进厌氧氨氧化反应从而提高脱氮效率; 但是当有机碳源质量浓度大于110 mg/L时, 会抑制厌氧氨氧化反应, 并降低脱氮效率. 在厌氧氨氧化工艺实际运行中, 应避免有机物质量浓度超过110 mg/L.

**关键词:** SBR; 有机碳源; 厌氧氨氧化; 颗粒污泥; 胞外聚合物

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)09-0116-07

## Effect of organic carbon source on granulation of anaerobic ammonia oxidation sludge

LI Dong<sup>1</sup>, WANG Yanju<sup>1</sup>, LÜ Yufeng<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>2</sup>, CHENG Shuo<sup>1</sup>, LÜ Saisai<sup>1</sup>, CAO Ruihua<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering(Beijing University of Technology), Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

**Abstract:** The effect of organic carbon source on the granulation of anaerobic ammonium oxidation (Anammox) sludge was tested in two parallel SBRs by gradually increasing the concentration of organic carbon source (R1) and by adding no organic carbon (R2). Results showed that appropriate concentration of organic carbon source (<130 mg/L) increased the amount of extracellular polymer (EPS) in the reactor and consequently accelerated the formation of granular sludge and enhanced sludge settling performance. Sludge in the two groups was granulated at 28 and 35 days and the particle sizes were 450 μm and 409 μm, respectively. However, excessive organic carbon sources (>230 mg/L) disintegrated sludge, reduced particle size, and worsened sludge settling performance significantly. Organic carbon source with a concentration lower than 110 mg/L promoted the anaerobic ammonia oxidation by denitrification, thereby improving N-removal efficiency. In contrast, when the concentration of organic carbon source was higher than 110 mg/L, anaerobic ammonia oxidation was inhibited and N-removal efficiency was decreased. Therefore, the concentration of organic carbon source should be equal to or lower than 110 mg/L during the operation of Anammox reactor.

**Keywords:** SBR; organic carbon source; Anammox; granular sludge; EPS

亚硝化-厌氧氨氧化工艺以其耗氧量低、无需外加有机碳源及运行费用低等优点<sup>[1-2]</sup>成为污水生物脱氮的研究热点. 然而, 厌氧氨氧化技术中厌氧氨氧化菌(AnAOB)生长速率缓慢, 世代时间长<sup>[3-4]</sup>, 如何实现AnAOB的有效滞留及快速富集成为制约其工程应用的关键<sup>[5]</sup>. 颗粒污泥以其沉降性能优良, 抗冲击性强, 可滞留大量生物体, 能够有效解决污泥流失的难题等优点成为厌氧氨氧化研究应用的

主要形式<sup>[6-7]</sup>. 范丹等<sup>[8]</sup>研究发现, 较低的有机物质量浓度使得反应器内微生物更易于相互聚集黏附, 从而加快污泥快速颗粒化, 增大颗粒粒径. Ni等<sup>[9]</sup>研究发现, 高浓度的有机物不利于Anammox污泥颗粒化. Li等<sup>[10]</sup>研究表明, 适量有机物的存在可以提高厌氧氨氧化菌的脱氮效率, 促进EPS的分泌从而加速颗粒化. 但是有机物对厌氧氨氧化污泥颗粒化的进程, 粒径大小的变化及颗粒污泥沉降性能等的具体影响尚不清楚. 由于污水中总是存在有机物, 故研究有机物存在下厌氧氨氧化颗粒化的过程对该技术的推广应用有重要的现实意义.

本实验以厌氧氨氧化絮状污泥为基础, 采用两组

收稿日期: 2017-04-16

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

作者简介: 李冬(1976—), 女, 教授, 博士生导师;

张杰(1938—), 男, 博士生导师, 中国工程院院士

通信作者: 李冬, lidong2006@bjut.edu.cn

相同的SBR,以投加有机碳源和不投加有机碳源做对比,探究有机碳源对厌氧氨氧化絮状污泥颗粒化的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

实验采用两组有机玻璃SBR,分别为R1、R2,有效容积4 L,高35 cm,内径13 cm。在反应器垂直方向设置一排间距为5 cm的取样口,用以排水和取样。反应器安装有搅拌机,使泥水混合均匀,搅拌机转速150 r/min。反应器内部装有pH、温度在线监测探头。

### 1.2 实验水质与污泥

接种污泥为厌氧氨氧化絮状污泥,初始污泥质

表1 实验水质

Tab.1 Characters of water for experiment

水质指标	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_2^--\text{N})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{MgSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{CaCl}_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{KH}_2\text{PO}_4/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	营养液 I/ $(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$	营养液 II/ $(\text{mL}\cdot\text{L}^{-1})$
数值	80	80	1 800	80	40	40	1	1

### 1.3 实验方法

反应器运行包括进水阶段(15 min)、反应阶段(反应时间根据周期实验结果确定)、沉淀时间(30 min—20 min—15 min—5 min—3 min)、排水(3 min)。温度控制在25℃左右,pH为7.6左右,换水比2/3。R1添加有机碳源,初始有机物质量浓度为50 mg/L,每周递增20 mg/L;R2不添加有机碳源,两个反应器的其他进水条件相同。对比R1、R2二者在颗粒形成进程及脱氮效果的差异。

### 1.4 检测项目及分析方法

$\text{NH}_4^+-\text{N}$ : 纳氏试剂分光光度法;  $\text{NO}_2^--\text{N}$ :  $\text{N}$ -(1-萘基)-乙二胺分光光度法;  $\text{NO}_3^--\text{N}$ : 紫外分光光度法; 粒径: Mastersize2000型激光粒度仪测定; MLSS: 重量法; pH、 $T$ : WTW在线测定仪; EPS中PS: 苯酚-硫酸比色法; PN: 考马斯亮蓝法; EPS的提取方法为首先取泥水混合样品于10 mL离心管中,室温下用离心机以8 000 r/min离心15 min,倒掉上清液,加入适量磷酸盐缓冲溶液,将污泥稀释至原体积,之后将污泥摇散后超声处理3 min,接着80℃水浴30 min(每隔10 min左右将泥摇匀1次),最后用离心机8 000 r/min离心15 min,取上清液测定多糖、蛋白质含量,剩余污泥测定MLSS。

反应速率的测定: 实验期间每周从稳定运行的R1和R2中各取出1 L泥水混合液,放入2个相同的烧杯内,设机械搅拌。分别测定Anammox反应速率及反硝化反应速率,用来表征AnAOB和反硝化菌的协同性、AnAOB的活性以及反硝化菌的活性。测定2种速率时,烧杯内温度均为25℃,pH为7.6左右。测定Anammox速率时,进水配亚硝酸盐氮

量浓度2 000 mg/L,分别接入R1和R2。进水采用人工配水,其中R1添加葡萄糖作为有机碳源,分别以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NaNO}_2$ 和 $\text{NaHCO}_3$ 作为 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 和碱度的来源,营养液I、II作为微量元素溶液<sup>[11]</sup>,营养液I包括EDTA 5 000 mg/L和 $\text{FeSO}_4$  5 000 mg/L。营养液II包括EDTA 15 000 mg/L、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$  430 mg/L、 $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  240 mg/L、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  990 mg/L、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  250 mg/L、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  220 mg/L、 $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  190 mg/L、 $\text{Na}_2\text{SeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$  210 mg/L和 $\text{H}_3\text{BO}_4$  14 mg/L。配水中另加适量 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 和微量 $\text{CoCl}_2$ 用以控制实验处于厌氧条件下。实验用水水质见表1。

(45.5 mg/L)与氨氮(34.5 mg/L),每隔1 h取出水测定氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮,待出水中三氮质量浓度不再发生变化时停止反应。测定反硝化反应速率时,进水只配亚硝酸盐氮(80 mg/L)和COD(随反应阶段不同),每隔1 h取出水测定亚硝酸盐氮,待出水中氮素质量浓度不再发生变化时停止反应。单位MLSS Anammox反应速率按式(1)计算,反硝化反应速率按式(2)计算:

$$v_{\text{Anammox}} = \frac{\rho_{\text{始}}(\text{TN}) - \rho_{\text{末}}(\text{TN})}{t \cdot \rho_{\text{MLSS}}}, \quad (1)$$

$$v_{\text{反硝化}} = \frac{\rho_{\text{始}}(\text{NO}_2^- - \text{N}) - \rho_{\text{末}}(\text{NO}_2^- - \text{N})}{t \cdot \rho_{\text{MLSS}}}. \quad (2)$$

氨氮去除主要由于厌氧氨氧化过程<sup>[10]</sup>,  $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) : \rho(\text{NO}_2^- - \text{N}) = 1 : 1.02$ ,反硝化去除的氮含量为

$$E_{\text{DN}} = \frac{\rho_{\text{去除}}(\text{NO}_2^- - \text{N}) - 1.02 \times \rho_{\text{去除}}(\text{NH}_4^+ - \text{N})}{\rho_{\text{去除}}(\text{NO}_2^- - \text{N})} \times 100\%. \quad (3)$$

厌氧氨氧化对总氮去除的贡献为

$$E_{\text{AN}} = E_{\text{TN}} - E_{\text{DN}}. \quad (4)$$

式中: TN, mg/L;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , mg/L;  $\text{NO}_2^- - \text{N}$ , mg/L;  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , mg/L;  $t$ , h;  $\rho_{\text{MLSS}}$ , mg/L;  $v_{\text{Anammox}}$ , mg/(h·g);  $v_{\text{反硝化}}$ , mg/(h·g)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机碳源对厌氧氨氧化颗粒污泥形成的影响

如图1所示,R1、R2中接种的污泥初始平均粒径约为130 μm。R1在第28天时平均粒径达

450  $\mu\text{m}$ , 而 R2 中平均粒径仅为 330  $\mu\text{m}$ . 杨麒<sup>[12]</sup>的研究中, 当污泥颗粒粒径达到 400  $\mu\text{m}$  时, 表明颗粒启动成功. 可见, 反应器运行 28 d 时 R1 中颗粒污泥已经启动成功, 而 R2 尚未成功, 其运行了 35 d 后平均粒径达到 409  $\mu\text{m}$ , 颗粒污泥才启动成功. 从岩等<sup>[13]</sup>的研究中无机配水启动 Anammox 颗粒所需时间为 34 d, 而本实验 R1 的 Anammox 颗粒启动时间更短; 同时, R1 的 Anammox 颗粒平均粒径在 60 d 时为 570  $\mu\text{m}$  左右, 大于唐晓雪等<sup>[14]</sup> 60 d 时培养的颗粒粒径 (200 ~ 500  $\mu\text{m}$ ).

通过计算两个反应器中颗粒粒径平均增长速率可知, 在前 35 d (第 35 天时 COD 为 130  $\text{mg/L}$ ), R1 的平均增长速率为 11.2  $\mu\text{m/d}$ , R2 的为 8.1  $\mu\text{m/d}$ , R2 明显低于 R1; 而从第 35 天到 70 天 (第 70 天时 COD 为 230  $\text{mg/L}$ ), R1 平均增长速率仅为 2.5  $\mu\text{m/d}$ , 明显低于 R2; R1 在第 70 天时平均粒径达到最大, 为 620  $\mu\text{m}$ , 在第 70 天后平均粒径呈现减小趋势. 分析是由于 R1 添加适量的 COD ( $\leq 130 \text{mg/L}$ ) 促进了颗粒的形成及颗粒的增长; 但当 COD 超过 130  $\text{mg/L}$  时, 平均粒径增长速率开始减缓; 当 COD 超过 230  $\text{mg/L}$  时, 颗粒粒径开始减小, 污泥出现解体现象. 分析认为<sup>[10, 15]</sup>, 较低的有机物浓度可以使反应器内异养菌与 Anammox 菌处于良性竞争阶段, 促进反应器内细胞菌群为保护自身生存而分泌更多的胞外聚合物, 使得反应器内微生物更易于相互聚集黏附, 从而加速污泥颗粒化, 增大了颗粒粒径; 而过高的有机物却破坏了 Anammox 细菌的组织结构.

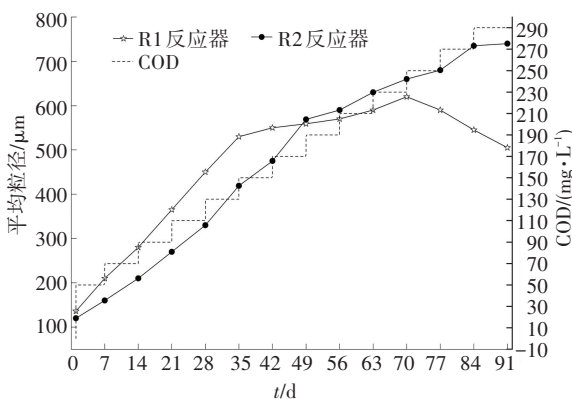


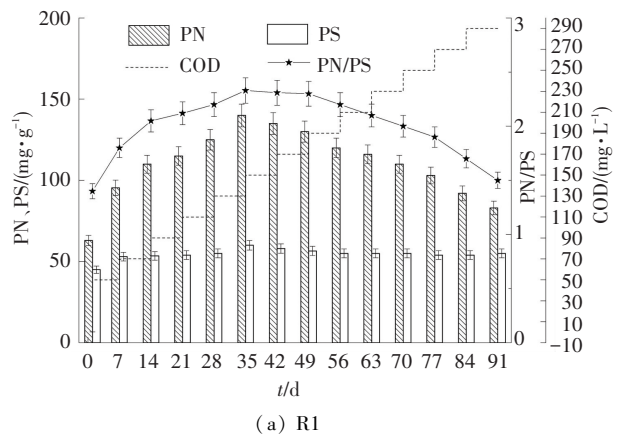
图 1 有机碳源对颗粒粒径的影响

Fig.1 Effect of organic carbon source on particle size

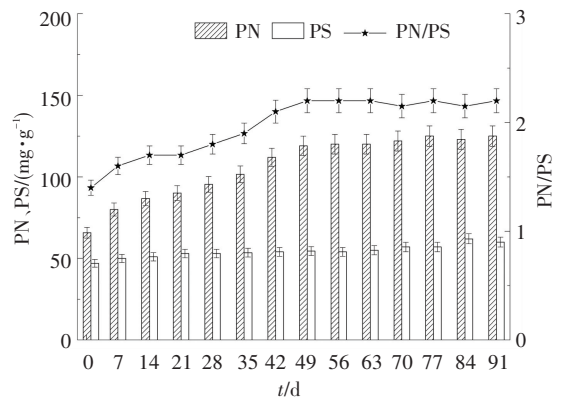
为了进一步分析 COD 对 Anammox 颗粒形成的作用机理, 通过定期测量两组反应器中污泥的 EPS 含量, 分析在 Anammox 颗粒污泥形成过程中, COD 对微生物分泌 EPS 的影响.

R1 和 R2 的 EPS 含量如图 2 所示. 对于 R1 和 R2 前 35 d 内, R1 单位 MLSS 的 PN、PS 分别由最初的 63, 45.1  $\text{mg/g}$  增大到 140, 60  $\text{mg/g}$ ; R2 的 PN、PS

则由最初的 65.8, 47  $\text{mg/g}$  增大到 112, 54  $\text{mg/g}$ ; R1、R2 的 PN 与 PS 比值则由最初的 1.4, 1.41 增大到 2.33, 1.9. 对比 R1、R2 的 PN、PS 含量及 PN 与 PS 比值的变化, 二者较大的差异是由于有机物存在的结果. 李冬等<sup>[5]</sup>研究发现少量有机物的存在可以提高 EPS 含量, 且有研究表明 EPS 具有增进细胞絮凝、维持颗粒结构和提供能源等多种作用<sup>[16]</sup>, 不断增加的 EPS 有助于促进污泥颗粒化并且维持颗粒结构的稳定. 吴昌永等<sup>[17]</sup>研究发现 PN 与 PS 比值的大小与污泥表面的疏水性和带电性及颗粒污泥的形成直接相关, 且随着颗粒污泥的形成, PN 与 PS 的比值有较大幅度的增加. 以上解释了 R1 中颗粒污泥启动时间比较短且粒径增长速率较快的原因.



(a) R1



(b) R2

图 2 有机碳源对 EPS 含量的影响

Fig.2 Effect of organic carbon source on EPS content

而运行了 35 d 后, 随着 COD 的继续增加, R1 中 PN、PS 的含量以及 PN 与 PS 比都呈现下降趋势, 李冬等<sup>[5]</sup>研究发现过量有机物的存在会降低 EPS 含量, 林志福等<sup>[18]</sup>认为 COD 过高会使得部分厌氧颗粒污泥解体而带来 EPS 的释放. EPS 含量及 PN 与 PS 比的持续下降都表明了颗粒污泥系统处于不稳定状态, 这解释了 R1 在运行 35 d 后粒径增长速率逐渐减缓并最终粒径减小的原因. 而 R2 中 PN、PS 的含量及 PN 与 PS 比保持增长并最终处于

稳定,这反映出 R2 颗粒污泥处于稳定状态并且粒径逐渐增大。

综上,适量的有机物可以通过提高 EPS 的含量及 PN 与 PS 的比值来加速颗粒化及提高粒径增长速率。故对于 Anammox 颗粒污泥工艺,在实际运行中应控制有机物的浓度,以避免有机物质量浓度过高使 Anammox 颗粒污泥解体,不利于颗粒污泥系统稳定运行。

## 2.2 有机碳源对厌氧氨氧化颗粒污泥沉降性能的影响

本实验通过逐渐降低沉淀时间(30 min—20 min—15 min—5 min—3 min),使结构松散、沉降性能不好的絮状污泥排出反应器,将沉降性能较好的污泥截留在反应器中。污泥容积指数(SVI)是指泥水混合液经过静置沉淀后,每克干污泥形成的沉淀污泥所占容积,能较好地反映出污泥的沉降性

能<sup>[19]</sup>。如图3所示,刚接种时 R1 的 SVI<sub>5</sub>(静止 5 min)和 SVI<sub>30</sub>(静止 30 min)分别为 112.1 和 90.5 mL/g; R2 的 SVI<sub>5</sub>和 SVI<sub>30</sub>分别为 114.3 和 92.1 mL/g。随着反应器的运行,两组的 SVI<sub>5</sub>和 SVI<sub>30</sub>值都在降低且 SVI<sub>5</sub>和 SVI<sub>30</sub>的差值在减小,这表明两组反应器的污泥凝聚性和沉降性能都在不断提高<sup>[21]</sup>,说明 R1、R2 内的颗粒污泥在逐渐形成。两组反应器运行了 35 d 时, R1 的 SVI<sub>5</sub>为 75.2 mL/g, SVI<sub>30</sub>为 65.2 mL/g;而此时 R2 的 SVI<sub>30</sub>为 72.9 mL/g, SVI<sub>5</sub>为 88.2 mL/g。在此阶段 R1 的 SVI 值都小于 R2,说明少量有机物可以提高污泥的凝聚沉降性能。而此后, R1 的 SVI 值逐渐大于 R2 的,并且 R1 在运行了 70 d 后,其 SVI 值逐渐增大,沉降性能变差。研究表明<sup>[21-22]</sup>,过量的有机物会导致丝状菌增殖使污泥沉降效果变差。本实验中沉降性能变差也可能是丝状菌增殖的结果。

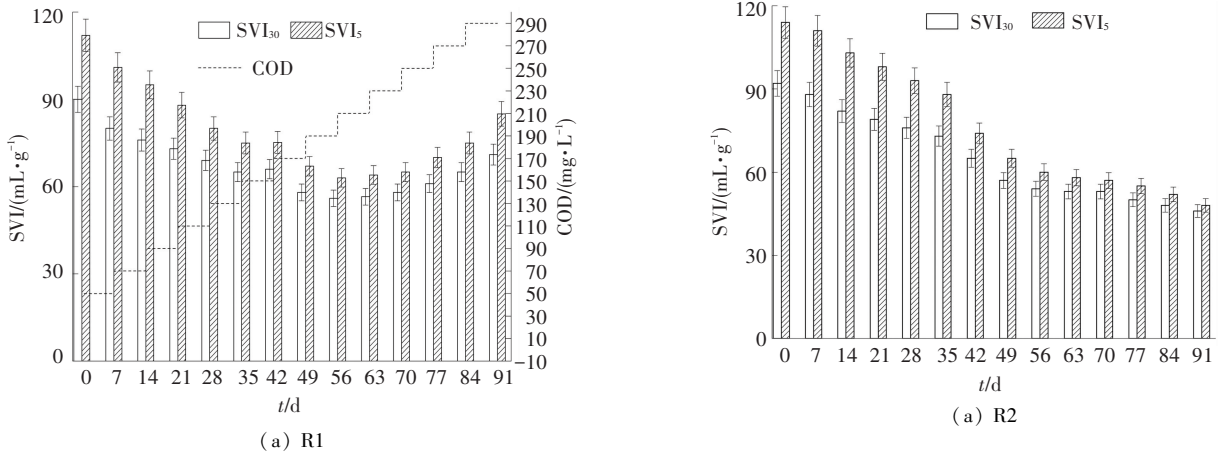


图3 有机碳源对污泥沉降性能的影响

Fig.3 Effect of organic carbon source on sludge settling performance

综上,当有机物质量浓度不超过 130 mg/L 时可以提高 Anammox 颗粒污泥的沉降性能,超过 230 mg/L 时则会导致污泥沉降效果变差。

## 2.3 有机碳源对厌氧氨氧化系统脱氮性能的影响

如图4所示, R1 和 R2 在经过 2 d 的适应后,氨氮、亚氮及总氮的去除率均开始提升。R1 的 COD 初始添加质量浓度为 50 mg/L,随着 COD 的提升,氨氮、亚氮、总氮的去除率稳定上升,并在第 28 天, COD 为 110 mg/L 时, R1 的氨氮、亚氮及总氮的去除率达到最高,分别为 90.3%、91.0% 和 83.4%, R1 的总氮去除污泥负荷为 0.125 kg/(kg·d); R2 的氨氮、亚氮、总氮的去除率达到最大并稳定在 85.6%、86.6% 和 78.4% 左右,总氮去除污泥负荷为 0.098 kg/(kg·d) 左右。R1 的最大去除效果明显优于 R2,分析是因为适量有机物存在下,有利于反硝化菌的生长,但此时 AnAOB 仍占主导地位,反硝化菌将 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 还原为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,同时 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 与

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 被 AnAOB 利用,从而提高了脱氮效率。这与国内外针对有机物对厌氧氨氧化的影响研究一致<sup>[23-25]</sup>。但当 R1 中 COD 超过 110 mg/L 时,氨氮去除率开始下降,亚氮去除率较为稳定,保持在 91.0% 左右,总氮去除率缓慢下降,当 COD 为 290 mg/L 时,氨氮去除率下降到 40.2%,总氮去除率下降到 63.8%,总氮去除污泥负荷下降为 0.082 kg/(kg·d)。研究表明<sup>[10,25]</sup>,过多的有机物会抑制厌氧氨氧化作用,致使反应器性能下降。本实验中分析是由于过多的有机物使反硝化菌快速增长,与 AnAOB 竞争 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,使得 AnAOB 缺乏基质,致使厌氧氨氧化反应受到抑制,从而降低了反应器的脱氮效果。

## 2.4 有机碳源下脱氮路径及功能菌活性分析

R1 始终都在有机物存在下运行, COD 由 50 mg/L 上升到 110 mg/L 时,总氮去除率由 68.1% 上升到 83.4%, COD 继续增加到 290 mg/L 时,总氮去除率又下降到 63.8%。在 COD 为 110 mg/L 时,氮

去除效果最佳. R1 中总氮去除率是由厌氧氨氧化和反硝化共同作用的结果. 本实验分析了在不同 COD 下, 厌氧氨氧化与反硝化的各自贡献量, 依据式(3)和(4), 并与之前的研究进行了对比, 结果如表 2 所示. 可以看出, 厌氧氨氧化对系统总氮去除的贡献率随着 COD 的提高也在逐渐提高, 当 COD 为 90 mg/L, 其贡献率最大为 79.0%. 周少奇等<sup>[26]</sup>研究 Anammox 与反硝化协同作用化学计量关系指出, Anammox 过程需要消耗无机碳, 而少量有机物的存

在会刺激反硝化菌的生长, 并通过反硝化作用产生无机碳, 从而促进 Anammox 反应的进行. 然而, 随着 COD 的继续提高, 厌氧氨氧化的贡献率逐步降低, 而反硝化的贡献率逐步提升. 当 COD 为 290 mg/L 时, 反硝化的贡献率达到最大为 56.4%, 厌氧氨氧化的贡献率达到最小为 7.4%. 说明在过量有机物的刺激下, 反硝化菌会抑制自养的 AnAOB 生长. 但是, 在适量的有机物存在下, 可以建立一个稳定高效的 Anammox 和反硝化共存的系统从而加强生物脱氮.

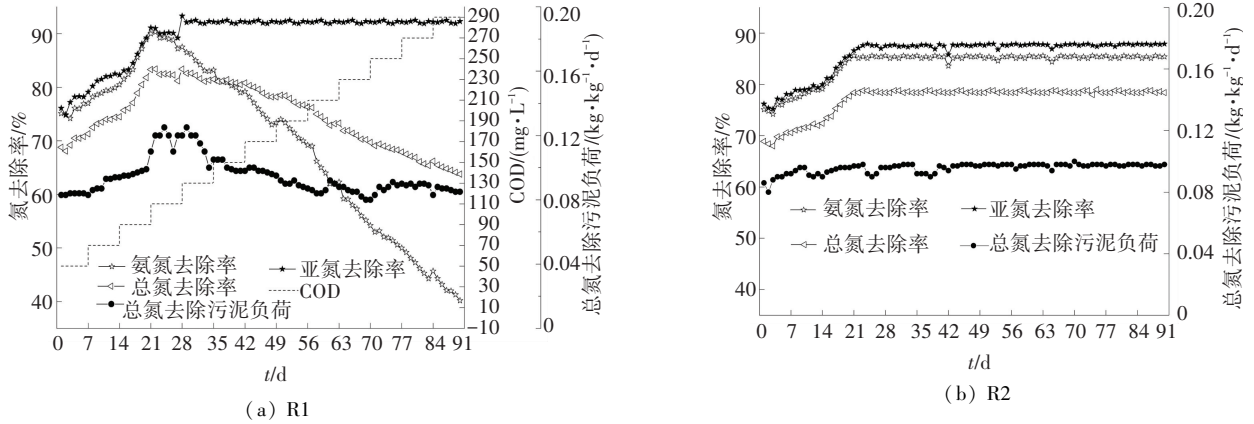


图 4 有机碳源对系统脱氮性能的影响

Fig.4 Effect of organic carbon source on nitrogen removal performance

表 2 不同 COD 下总氮去除路径分析

Tab.2 Pathway analysis of total nitrogen removal under different COD

COD/(mg · L <sup>-1</sup> )	进水/(mg · L <sup>-1</sup> )		总氮去除贡献率/%		水质类型	文献
	氨氮	亚氮	反硝化	厌氧氨氧化		
41.0~1 062.5	167.8±78.1	228.7±154.5	14.90	85.1	城市垃圾渗滤液	[27]
290	80	84	22.52 <sup>a</sup>	0	亚硝化出水	[15]
300	300	300	27.00	83.0	人工配水	[10]
200	200	200	32.00	80.0	人工配水	[10]
100	100	100	2.90	98.0	人工配水	[10]
50	80	80	2.70	68.6	人工配水	本文
90	80	80	3.50	79.0	人工配水	本文
190	80	80	25.00	51.4	人工配水	本文
290	80	80	56.40	7.4	人工配水	本文

注: a. 氨氮去除率.

为了比较两个反应器功能菌的活性, 分别选择第 7, 28 和 63 天对 R1 测定了 Anammox 反应速率及反硝化反应速率, 由于 R2 没有有机碳源, 反硝化作用较弱, 故只表现了 Anammox 反应速率. 由图 5 可知, 第 7 天时, R1、R2 单位 MLSS 的 Anammox 反应速率分别为 9.1 和 8.3 mg/(h · g). 由于 R1 加入了 50 mg/L 的有机物, 刺激了 Anammox 反应, AnAOB 的活性优于 R2. 第 28 天时, R1、R2 的 Anammox 反应速率分别为 10.35 和 9.25 mg/(h · g). 此时, R1 中有机物质量浓度为 110 mg/L, 经过 28 d 的运行,

R1 内 AnAOB 的活性明显高于 R2. 第 63 天时, R1、R2 的 Anammox 反应速率分别为 6 和 9.25 mg/(h · g). 此阶段由于添加过量的有机物, 使得 R1 内 AnAOB 的活性明显低于 R2. 这是由于向培养成熟的自养厌氧氨氧化污泥中添加少量葡萄糖能促进厌氧氨氧化菌的活性, 但高质量浓度的葡萄糖则抑制了厌氧氨氧化菌的活性<sup>[23]</sup>.

而 R1 反硝化菌的反应速率在第 7, 28, 63 天时分别为 0.36, 0.82, 4.8 mg/(h · g). 其反硝化反应速率随着 COD 的增加 (50—110—210 mg/L) 逐渐增

强,这是由于有机物的存在促进了反硝化菌的生长并表现出逐渐增强的反硝化活性,从而反硝化反应速率逐渐增强。综上,适量的有机物可以增强 AnAOB 和反硝化菌的活性,并使二者产生协同作用,而过量的有机物会抑制 AnAOB 活性,极大地增强反硝化菌的活性,使得反硝化反应成为主导反应,不利于系统稳定。

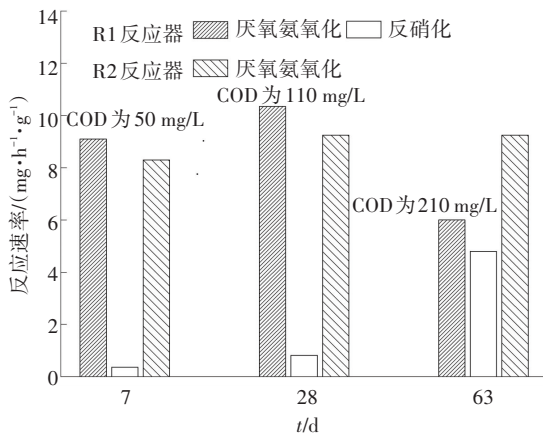


图5 有机碳源对系统反应速率的影响

Fig.5 Effect of organic carbon source on reaction rate

### 3 结论

1) 当有机碳源小于 130 mg/L 时,微生物会分泌更多的 EPS,促进 Anammox 颗粒污泥的快速形成。添加有机碳源的反应器 28 d 成功实现 Anammox 污泥颗粒化,粒径达到了 450  $\mu\text{m}$ 。不添加有机碳源的反应器 35 d 方成功启动,Anammox 颗粒污泥粒径仅为 409  $\mu\text{m}$ 。

2) 污泥沉降性能受有机碳源影响较大。当有机碳源小于 130 mg/L 时,其污泥沉降性能优于不添加有机碳源的反应器;当有机碳源大于 230 mg/L 时,Anammox 污泥颗粒出现解体,其污泥沉降性能明显劣于不添加有机碳源的反应器。

3) 有机碳源小于 110 mg/L 时可以提高系统的脱氮效率,但是当有机碳源大于 110 mg/L 时,Anammox 反应会受到抑制,总氮去除率降低。

### 参考文献

[1] POLLICE A, TANDOI V, LESTINGI C. Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate [J]. *Water Research*, 2002, 36(10): 2541. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00468-7

[2] 马富国, 张树军, 曹相生, 等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化耦合工艺处理污泥脱水液[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(2): 219. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2009.02.020

MA Fuguo, ZHANG Shujun, CAO Xiangsheng, et al. Coupling process of partial nitrification and anammox for treatment of sludge liquor[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2): 219. DOI:

10.3321/j.issn:1000-6923.2009.02.020

[3] STROUS M, FUERST J A, KRAMER E H M, et al. Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, 400(6743): 446. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6923.2009.02.020

[4] STROUS M, HEIJNEN J J, KUENEN J G, et al. The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1998, 50(5): 589. DOI: 10.1007/s002530051340

[5] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 6. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.002

LI Dong, TIAN Haicheng, LIANG Yuhai, et al. Effect of quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 6. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.002

[6] STAR VAN DER W R L, ABMA W R, BLOMMERS D, et al. Start-up of reactors for anoxic ammonium oxidation; Experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, 41(18): 4149. DOI: 10.1016/j.watres.2007.03.044

[7] HENDRICKX T L G, WANG Y, KAMPMAN C, et al. Autotrophic nitrogen removal from low strength wastewater at low temperature [J]. *Water Research*, 2012, 46(7): 2187. DOI: 10.1016/j.watres.2012.01.037

[8] 范丹, 李冬, 梁瑜海, 等. 生活污水 SNAD 颗粒污泥快速启动及脱氮性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3321

FAN Dan, LI Dong, LIANG Yuhai, et al. Fast startup and nitrogen removal performance of SNAD granular sludge for treating domestic sewage [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(11): 3321

[9] NI Shouqing, NI Jianyuan, HU Deliang, et al. Effect of organic matter on the performance of granular anammox process [J]. *Biore-source Technology*, 2012, 110: 701. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.01.066

[10] LI Yuan, HAUNG Zhenxing, RUAN Wenquan, et al. ANAMMOX performance, granulation, and microbial response under COD disturbance [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2015, 90(1): 139. DOI: 10.1002/jctb.4298

[11] DEGRAAF A, DEBRUIJN P, ROBERSON L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, 142(8): 2187. DOI: 10.1099/13500872-142-8-2187

[12] 杨麒. 好氧颗粒污泥快速培养及其去除生物营养物特性的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2008

YANG Qi. Research on rapid cultivation of aerobic granular sludge and its characteristics in biological nutrient removal [D]. Changsha: Hunan University, 2008

[13] 丛岩, 黄晓丽, 王小龙, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成 [J]. *化工学报*, 2014, 65(2): 64. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.02.042

CONG Yan, HUANG Xiaoli, WANG Xiaolong, et al. Faster formation of anammox granular sludge [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(2): 664. DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.02.042

[14] 唐晓雪, 彭永臻, 徐竹兵, 等. 低基质质量浓度厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的快速启动 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(12): 4445

TANG Xiaoxue, PENG Yongzhen, XU Zhubing, et al. Fast start-up of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) granular reactor treating low-strength wastewater [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4445

- [15] MOLINUEVO B, GARCIA M C, KARAKASHEV D, et al. Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: Effect of organic matter content on process performance [J]. *Bioresource Technol*, 2009, 100(7): 2171. DOI:10.1016/j.biortech.2008.10.038
- [16] 李冬, 吴青, 梁瑜海, 等. 不同基质条件对亚硝化污泥胞外聚合物的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(4): 81. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.014
- LI Dong, WU Qing, LIANG Yuhai, et al. Effect of substrate concentration and type on the content of extracellular polymeric substances in the nitrification sludge[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(4): 81. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.014
- [17] 吴昌永, 王然登, 彭永臻, 等. 污水处理颗粒污泥技术原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 140
- WU Changyong, WANG Randeng, PENG Yongzhen, et al. Principle and application of granular sludge in wastewater treatment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 140
- [18] 林志福, 伍健东, 周兴求, 等. 厌氧颗粒污泥胞外聚合物的影响因素研究[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(7): 1311
- LIN Zhifu, WU Jiandong, ZHOU Xingqiu, et al. Study on influencing factors of EPS in anaerobic granular sludge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1311
- [19] 张自杰, 顾夏声, 林荣忱, 等. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 107
- ZHANG Zijie, GU Xiasheng, LIN Rongchen, et al. Drainage engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2000: 107
- [20] 李冬, 姜沙沙, 张金库, 等. 颗粒活性炭诱导亚硝化污泥快速颗粒化[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 50. DOI:10.3969/j.issn.1000-6923.2016.01.009
- LI Dong, JIANG Shasha, ZHANG Jinku, et al. Induce of granular activated carbon on partial nitrification granular sludge[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 50. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.01.009
- [21] YU Shenjing, SUN Peide, ZHENG Wei, et al. The effect of COD loading on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 80. DOI:10.1016/j.biortech.2014.08.057
- [22] LI Dong, LV Yufeng, ZENG Huiping, et al. Long term operation of continuous-flow system with enhanced biological phosphorus removal granules at different COD loading [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 216: 761. DOI:10.1016/j.biortech.2016.06.022
- [23] 刘金苓, 钟玉鸣, 谢志儒, 等. 厌氧氨氧化微生物在有机碳源条件下的代谢特性[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(10): 2041. DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2009.10.004
- LIU Jinling, ZHONG Yuming, XIE Zhiru, et al. Metabolism of anaerobic ammonium oxidizing (anammox) bacteria with organic carbon addition[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2041. DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2009.10.004
- [24] 张少辉, 李聪. 有机碳源条件下的厌氧氨氧化研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(3): 130. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2011.03.028
- ZHANG Shaohui, LI Cong. Anammox process in the presence of organic carbon source[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(3): 130. DOI: 10.3963/j.issn.1671-4431.2011.03.028
- [25] TANG Chongjian, ZHENG Ping, WANG Caihua, et al. Suppression of anaerobic ammonium oxidizers under high organic content in high-rate Anammox UASB reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 6(101): 1762. DOI:10.1016/j.biortech.2009.10.032
- [26] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(5): 1. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X.2006.05.001
- ZHOU Shaoqi. Stoichiometric analysis of combined reaction of anaerobic ammonia oxidation with denitrification [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(5): 1. DOI:10.3321/j.issn:1000-565X.2006.05.001
- [27] VEYS P, VANDEWEYER H, AUDENAERT W, et al. Performance analysis and optimization of autotrophic nitrogen removal in different reactor configurations: A modelling study[J]. *Environ Technol*, 2010, 31(12): 1311. DOI: 10.1080/09593331003713685

(编辑 刘彤)